



# **Implementação do modo de operação em duplo canal para um regulador automático de tensão**

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito para a aprovação na disciplina*

***DAS 5511: Projeto de Fim de Curso***

***Marcus Aurélio Almeida Tavares***

*Florianópolis, janeiro de 2016*

# **Implementação do modo de operação em duplo canal para um regulador automático de tensão**

***Marcus Aurélio Almeida Tavares***

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina  
**DAS5511: Projeto de Fim de Curso**  
e aprovada na sua forma final pelo  
**Curso de Engenharia de Controle e Automação**

***Prof. Marcelo Ricardo Stemmer***

---

Assinatura do Orientador

Banca Examinadora:

Christian Boava  
*Orientador na Empresa*

Prof. Marcelo Ricardo Stemmer  
*Orientador no Curso*

Prof. Daniel Lima  
*Avaliador*

Marcelo Sousa Menegol  
Heron Vitor Monteiro  
*Debatedores*

## **Agradecimentos**

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais por conseguirem prover recursos para que eu pudesse chegar ao final da graduação em engenharia de controle e automação. Não só recursos financeiros mais como recursos educacionais e morais.

Agradeço também a todos professores, servidores e colegas da faculdade por me proporcionar um dia a dia prazeroso e proveitoso durante todos esse período. Sem essas pessoas talvez eu não teria enfrentado os desafios da vida acadêmica com tanta força.

Mais especificamente em relação ao meu PFC gostaria de agradecer ao meu orientador na empresa, Christian Boava e a toda a equipe do setor de pesquisa e desenvolvimento da seção de drives engenheirados da WEG, que muito me ensinaram e me ajudaram durante o estágio.

Por ultimo e não menos importante agradeço a Maria Luiza por estar ao meu lado durante quase todo o período de faculdade me consolando nos momentos difíceis e me servindo de exemplos de honestidade e perseverança.

## Resumo

Este documento relata o desenvolvimento de um projeto realizado durante o período de seis meses de trabalho como estagiário na empresa WEG Drives & Control. A WEG é uma empresa multinacional com sede em Jaraguá do Sul, no Estado de Santa Catarina. É a maior fabricante de motores elétricos do mundo atuando também nos setores de automação industrial, tintas, de transmissão e distribuição e de sistemas críticos de energia.

O objetivo principal do projeto foi a implementação do modo de operação em duplo canal para um regulador de tensão desenvolvido pela WEG, o ECW500. No modo de operação em duplo canal existem dois reguladores interconectados formando um sistema de redundância para a excitação de máquinas síncronas.

Neste documento estão contidos as definições do projeto, as tecnologias usadas, os algoritmos implementados e um breve relatório de testes do modo de operação projetado.

Durante o período de estágio foram realizadas outras atividades, que apesar de não relatadas neste documento contribuíram de forma indireta para o mesmo. Todo o trabalho foi realizado sob supervisão constante do orientador na empresa e contou também com outros colegas de trabalho responsáveis pelo setor de redes industriais.

## **Abstract**

This paper reports the development of a project conducted over a period of two months working as an intern in the company WEG Drives & Control. WEG is a multinational corporation headquartered in Jaragua do Sul, state of Santa Catarina. It is the largest manufacturer of electric motors in the world and is active in the industrial automation sector, paints, transmission and distribution and critical power systems.

The main objective of the project was the implementation of the dual channel operating mode for a voltage regulator developed by WEG, the ECW500. In the dual channel operation mode, there are two regulators interconnected to form a redundancy system for excitation of synchronous machines.

In this document are contained the project settings, the technologies used, the implemented algorithms and a brief report of the designed operating mode tests.

During the probationary period it was carried out other activities which, although not reported in this document have contributed indirectly to the same. All work was carried out under constant supervision of the mentor in the company and also had other co-workers responsible for the industrial networking sector.

# Sumário

Agradecimentos.....	5
Resumo .....	6
Abstract .....	7
Capítulo 1: Introdução.....	10
1.1: A empresa.....	10
1.1.1: WEG S.A .....	10
1.1.2: WEG Drives e Controls.....	10
1.2: Regulador automático de tensão .....	11
1.2.1: ECW500 .....	12
1.3: Motivação.....	13
1.4: Contexto com o curso .....	14
1.5: Operação em Duplo Canal.....	14
Capítulo 2: Especificação de requisitos.....	16
2.1: Hierarquia Mestre e Escravo.....	16
2.2: Compartilhamento de conexões e medições .....	16
2.3: Parâmetros de configuração .....	16
2.4: Excitação da máquina.....	17
Capítulo 3: Interface de comunicação .....	18
3.1: Modelo OSI .....	18
3.2: Camada Física .....	19
3.3: Camada de Enlace.....	21
3.4: Camada de Aplicação - Modbus .....	23
3.4.1: Modbus™ .....	23
3.4.2: Funcionamento do Modbus .....	23
3.4.3: Modbus ECW .....	25



3.5: Heart-Beat.....	25
3.5.1: Hardware .....	25
3.5.2: Firmware.....	26
3.5.3: Performance .....	26
Capítulo 4: Duplo Canal.....	28
4.1: Estrutura do projeto do ECW .....	28
4.2: Máquina de estados finitos .....	28
4.3: Configurações .....	31
Capítulo 5: Testes .....	33
5.1: Testes temporais.....	33
5.2: Testes elétricos .....	35
Capítulo 6: Resultados e considerações finais .....	42
Bibliografia:.....	43

## **Capítulo 1: Introdução**

### **1.1: A empresa**

#### **1.1.1: WEG S.A**

A WEG foi fundada em 16 de setembro de 1961 por Werner Ricardo Voigt um eletricitista, Eggon João da Silva um administrador e Geraldo Werninghaus um mecânico como Eletromotores Jaraguá. No início a WEG produzia motores elétricos para o mercado brasileiro. Atualmente é uma das maiores fabricantes de equipamentos elétricos do mundo, fornecendo soluções para as áreas de comando e proteção, variação de velocidade, automação de processos industriais, geração e distribuição de energia, tintas e vernizes industriais. Em números, a WEG conta com mais de 32 mil colaboradores, tem uma receita líquida de mais de 7,8 bilhões de reais e está presente com unidades produtivas e/ou escritórios comerciais em 33 países. A WEG se tornou uma empresa de capital aberto dez anos após sua fundação, em 1971, e possui valor de mercado de aproximadamente 32 bilhões de reais. Para o futuro a WEG tem uma meta bastante ousada, "20 em 20", que significa alcançar um lucro líquido de 20 bilhões de reais em 2020. Para isso a WEG vem realizando uma série de aquisições de empresas que atuam nos mesmos setores, sendo sua maior aposta nas soluções para geração de energia renovável. O grupo WEG S.A é dividido em cinco principais empresas, que são a WEG Motores, WEG Tintas, WEG Energia e WEG Drives e Controls e WEG Automação.

#### **1.1.2: WEG Drives e Controls**

A WEG Drives e Controls (WDC) é a parte da WEG responsável pelo desenvolvimento e produção dos inversores de frequência, controladores lógicos programáveis, conversores CA/CC, servo-acionamentos, soft-starters, reguladores de tensão automáticos (AVR), dispositivos de partida e proteção de motores e medidores inteligentes de energia. Um panorama geral dos produtos pode ser visualizado na figura 1. A WDC está situada no parque fabril II em Jaraguá do Sul, o maior parque fabril de motores do mundo. Com o privilégio de desenvolver este projeto de conclusão de curso na WDC, tive contato com profissionais altamente

qualificados e laboratórios equipados com instrumentos de ponta. Além do desenvolvimento deste PFC também tive a oportunidade de trabalhar e ter um contato com outros segmentos em desenvolvimento na WDC como inversores de tensão para geração de energia eólica e solar. Trabalhar na WDC me possibilitou ampliar meus conhecimentos em algumas vertentes do curso, que foram pouco exploradas durante a graduação como eletricidade industrial, máquinas elétricas e geração e conversão de energia elétrica.



Figura 1. Produtos da WDC

## 1.2: Regulador automático de tensão

Um regulador automático de tensão ou *automatic voltage regulator* (AVR) é um dispositivo utilizado na excitação de máquinas síncronas objetivando o controle de algumas características de operação da mesma.

Na maioria das aplicações o AVR opera com o intuito de controlar a tensão trifásica da saída da máquina síncrona [ 3 ]. Mas também possui modos de operação em que se controla o fator de potência, potência reativa ou a corrente de excitação de campo. Um AVR também pode funcionar como um sistema de partida suave (soft-start) e de proteção para a máquina que excita. Reguladores automáticos de tensão são vastamente empregados em sistemas de geração de energia. De uma

forma simplificada, a energia mecânica advinda da fonte (como por exemplo uma turbina hidroelétrica) impõe velocidade no rotor da máquina, e através da excitação controlada das bobinas do rotor gera uma tensão induzida nos terminais do estator. As características de operação da maquina são por sua vez controladas pelo AVR através da corrente de excitação da máquina. Este funcionamento está ilustrado na figura 2. A saída do regulador é ligada diretamente na excitatriz da máquina e os terminais de saída da maquina são ligados ao regulador como forma de realimentação de tensão e corrente. Além disso o regulador conta com entradas e saídas auxiliares configuráveis e interfaces de comunicação como por exemplo RS-485.

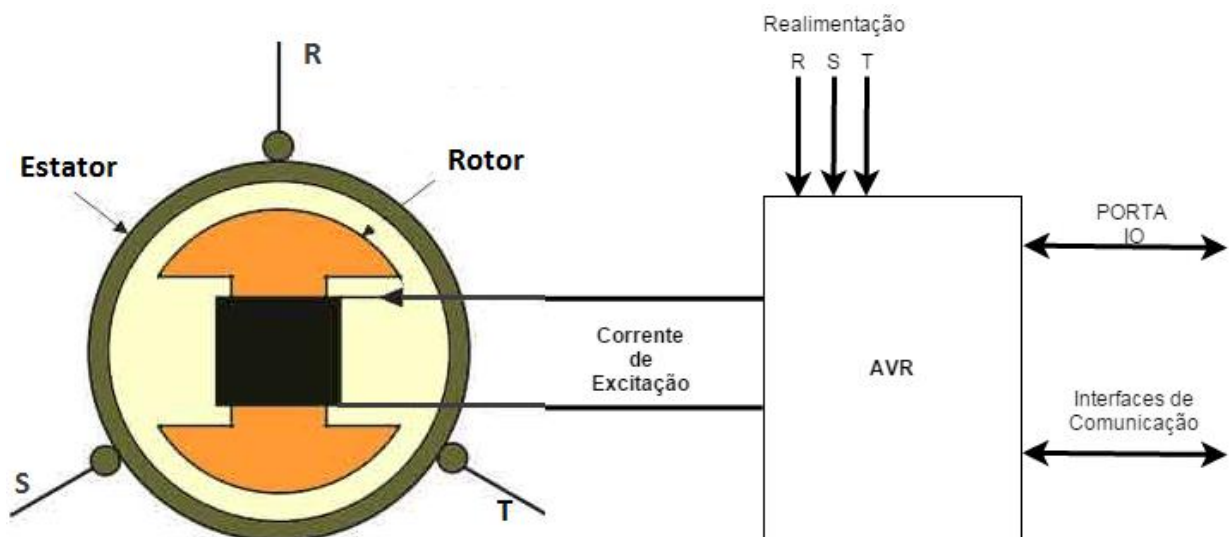


Figura 2. Esquema simplificado do uso de um AVR

### 1.2.1: ECW500

O ECW500 [ 2 ] é o regulador de tensão desenvolvido pela WEG, figura 3. Foi projetado para operar com uma tensão de entrada de 85 a 242 Vca ou 85 a 150 Vcc e uma corrente máxima de excitação de 20A com uma tensão de 110 Vcc na saída. Fornecendo uma potência nominal de 2.2kW à excitatriz da máquina síncrona. Possui cinco modos de operação: modo de controle de tensão, controle de corrente, controle de tensão com droop de reativo, controle do fator de potência, controle de

potência reativa. O ECW500 possui também limitadores exclusivos para cada modo de operação, função de rampa de partida, proteções que podem desligar o equipamento em caso de mau funcionamento, entradas e saídas digitais configuráveis, interface humano máquina para visualização e configuração de parâmetros.



Figura 3. ECW 500

### 1.3: Motivação

Este PFC foi desenvolvido como parte de um projeto da WDC com principal objetivo de criação de novas funcionalidades para o ECW500 e a revisão do design de hardware e firmware existente no produto. Visando concorrer frente a frente com os reguladores de tensão de topo de linha do mercado.

Foram previstos no escopo do projeto a implementação das seguintes funcionalidades:

- Auto-tuning dos parâmetros de controle;

- Função de oscilografia para salvar dados do regulador na ocorrência de eventos programados;
- Comunicação de parâmetros e comandos via protocolo Modbus™/TCP;
- Comunicação de parâmetros e comandos através dos dispositivos Anybus CompactCom®;
- Modo de operação de duplo canal.

Neste trabalho serão discutidos pontos apenas da implementação do modo de operação em duplo canal.

## **1.4: Contexto com o curso**

Durante o desenvolvimento deste trabalho diversos conceitos advindos das disciplinas do curso de engenharia de controle e automação puderam ser discutidos e aplicados. Sendo de grande importância para a qualidade das soluções encontradas. Como mais relevantes citam-se as disciplinas DAS5314(Redes de Computadores para Automação), DAS5332 (Arquitetura e Programação de Sistemas Microcontrolados) e EEL5346 (Eletrônica Básica).

## **1.5: Operação em Duplo Canal**

Em sistemas de geração de energia elétrica e também outros projetos de engenharia que necessitem um alto grau de confiabilidade, é muito comum o uso de alguma forma de redundância. Sistemas redundantes são desenvolvidos de forma que uma falta ou mau funcionamento isolado não cause no sistema a uma falha geral. Um exemplo de sistema redundante é a comunicação entre os sensores na calda dos aviões e o controlador central na cabine. Ela é feita através de dois hardwares diferentes e o cabeamento da comunicação é passado por lados diferentes do avião. Sendo assim, se alguma pane em um dos sistemas de comunicação ocorrer ou se um dos cabos romper, o sistema de uma forma global é capaz de continuar operando.

No caso deste PFC trataremos do sistema , que é empregado na excitação de máquinas síncronas. O dispositivo responsável pela excitação das máquinas síncronas, como já mencionado anteriormente, pode ser um regulador automático de tensão (AVR). Este tipo de sistema redundante geralmente é composto basicamente por dois AVRs compartilhando as mesmas ligações com a máquina. No mercado dos AVRs existe uma terminologia para este tipo de aplicação, ela é chamada de modo de operação em duplo canal.

O objetivo principal do modo de operação em duplo canal é manter a excitação controlada da máquina caso aconteça uma falha no regulador que esteja realizando a excitação. Caso isso ocorra um outro AVR deve assumir o controle da excitação afim de manter o sistema funcionando e com o mínimo efeito transitório. Uma maior explicação sobre este sistema e seu funcionamento será discutida ao longo deste PFC.

No capítulo 2 será apresentada a especificação de requisitos levantada no início do projeto para o funcionamento do modo de operação. No capítulo 3 será apresentado o desenvolvimento da interface de comunicação e as tecnologias usadas para o compartilhamento e de informações entre os reguladores. No capítulo 4 será discutida a implementação do código de controle para o modo de operação implementado. No capítulo 5 serão apresentados alguns testes realizados e por fim no capítulo 6 é feita a exposição dos resultados e perspectivas para o trabalho.

## **Capítulo 2: Especificação de requisitos**

A especificação de requisitos para o modo de operação em duplo canal foi elaborada em 2010, na concepção do produto, pela equipe de engenheiros responsáveis na época. Sendo assim, a especificação dos requisitos utilizada para o desenvolvimento deste PFC foi obtida a partir de uma adaptação da especificação inicial. Algumas modificações foram feitas em acordo com o atual engenheiro responsável pelo produto e também orientador deste PFC.

Os requisitos definidos visam a integridade e estabilidade do sistema, a minimização os efeitos causados no momento da comutação e também aumentar a imunidade do sistema frente a falhas esporádicas.

### **2.1: Hierarquia Mestre e Escravo**

O modo de operação a ser desenvolvido deve operar com a hierarquia de mestre e escravo. O regulador mestre tem o direito de excitar a máquina. Ao mesmo tempo, deve existir um regulador escravo aguardando um erro ou mau funcionamento do mestre, para então assumir o posto de mestre e continuar controlando a máquina. O sistema deve operar em modo de duplo canal se, e somente se, existir apenas um mestre e um escravo interligados. Quaisquer outras combinações devem ser ignoradas. A atribuição inicial de mestre ou escravo deve ser responsabilidade do usuário.

### **2.2: Compartilhamento de conexões e medições**

Os dois reguladores operando em modo duplo canal devem dividir todas as conexões com a máquina. Ao retirar qualquer conexão de um dos reguladores, o sistema deve continuar operando normalmente.

### **2.3: Parâmetros de configuração**

Deve existir na inicialização do modo de duplo canal a sincronização dos parâmetros de configuração entre os reguladores. Os parâmetros do regulador



configurado como mestre devem ser copiados para o regulador escravo. Com exceção dos parâmetros que variam de acordo com o hardware e, portanto dependem de calibração, como por exemplo ganhos e offsets das entradas e saídas analógicas.

Uma vez operando em modo de duplo canal o regulador escravo não deve aceitar alterações em seus parâmetros. Os parâmetros alterados no regulador mestre durante a operação devem ser copiados para o regulador escravo.

Durante a operação em duplo canal as variáveis de controle devem ser copiadas para o escravo ciclicamente o mais rápido possível. Pois em caso de comutação o regulador escravo deve possuir as variáveis de estado do controlador aproximadamente iguais as do mestre. O atraso na atualização destas variáveis deve ser muito menor que a constante de tempo da máquina em excitação.

## **2.4: Excitação da máquina**

Deve existir em um instante de tempo um e apenas um regulador excitando a máquina. Caso ambos reguladores controlem a excitação da máquina ao mesmo tempo o sistema pode se tornar instável. Existem também riscos à integridade física dos módulos IGBT e demais componentes elétricos dos reguladores.

## **2.5: Conclusão**

Com os requisitos levantados iniciou-se as etapas de validação de hardware e validação de firmware necessários para o comprimento dos mesmos.

## Capítulo 3: Interface de comunicação

A troca de informações entre os reguladores é de fato a habilidade do sistema mais relevante para a operação em modo de duplo canal. Através da interface de comunicação as variáveis, estados e comandos podem ser enviados de um regulador para o outro. Permitindo que algumas conclusões sobre o estado geral do sistema podem ser deduzidas internamente em cada regulador. Por exemplo, caso ocorra uma falha grave no regulador principal o mesmo pode enviar uma mensagem para que o regulador em retaguarda assuma o comando. Certamente se não existisse um meio de comunicação entre os reguladores, a ação descrita neste exemplo seria impossível. Alguns requisitos obrigatórios para o sistema só podem ser checados pela comunicação, como a sincronização dos parâmetros de controle e a versão de firmware de cada regulador.

### 3.1: Modelo OSI

O modelo OSI ou *Open System Interconnection Reference Model* (Modelo de referência para a interconexão de sistemas abertos) é um padrão para a descrição de redes de comunicação entre dispositivos. Foi elaborado pela Organização Internacional para a Normalização (ISO). O modelo OSI separa uma rede de comunicação em sete camadas (tabela 1), são elas: camada de aplicação, apresentação, sessão, transporte, enlace e física. Uma camada é composta por coleção de funções similares que fornecem serviços para as camadas acima e recebem serviços das camadas a baixo. Quanto maior o nível da camada, maior é o nível de abstração das funções que a compõem. Uma rede não precisa necessariamente possuir todas as camadas implementadas, geralmente redes industriais seguem a tendência de possuir um número reduzido de camadas, devido alguns requisitos temporais e a capacidade de processamento dos dispositivos. Na tabela 1 temos uma breve descrição sobre as funções de cada camada com alguns exemplos de protocolos existentes.

Tabela 1. Camadas do modelo OSI

Nível	Camada	Função	Protocolo
7	Aplicação	Entregar os dados ao usuário	HTTP,FTP,Modbus
6	Apresentação	Formatação dos dados de/para a camada de aplicação	XDR,TLS
5	Sessão	Coordenar a troca de dados entre emissor e receptor	NetBIOS
4	Transporte	Divisão dos dados em pacotes para transmissão	TCP,UDP
3	Rede	Gestão de endereçamento de dados entre redes	IP,ARP
2	Enlace	Tradução e correção de dados, endereçamento	Ethernet, Token Ring
1	Física	Transmissão dos sinais elétricos	EIA-422, Bluetooth, USB

Assim como os demais dispositivos industriais, a interface de comunicação que compõe o sistema de duplo canal foi composta por três camadas (Tabela 2). A camada física, responsável pela transmissão dos sinais elétricos. A camada de enlace, responsável pela interpretação dos sinais elétricos e verificação de falhas de transmissão. E por último a camada de aplicação, responsável pelo tratamento dos bytes recebidos em forma de telegrama. Uma explicação mais detalhada sobre a implementação de cada camada será dissertada no restante deste capítulo.

Tabela 2. Visão geral das camadas da interface de comunicação

Nível	Camadas	Implementação
7	Aplicação	Modbus - RTU Firmware
2	Enlace	Endereçamento, byte checksum, CRC Firmware Hardware
1	Física	RS-422 Hardware

### 3.2: Camada Física

A camada física presente no sistema desenvolvido foi projetada na concepção do produto. Apesar de não ter sido desenvolvida dentro deste PFC, uma breve explanação sobre seu funcionamento é imprescindível para a compreensão do sistema por completo.

A funcionalidade básica da camada física é permitir que um sinal elétrico de tensão emitido pela porta serial do microprocessador de um dos reguladores chegue a porta serial do processador do outro regulador. Como o objetivo do modo de operação em duplo canal é operar com apenas dois reguladores conectados ao mesmo tempo, a topologia da rede escolhida pelos desenvolvedores foi a de

transmissão ponto a ponto (P2P). O protocolo de transmissão escolhido foi o RS-422 devido sua confiabilidade, velocidade e padronização de código e componentes eletrônicos. Já que as outras interfaces de comunicação serial que o ECW500 possui têm a mesma estrutura.

O RS-422 é um protocolo de comunicação serial definido pela EIA (Electronic Industries Alliance). O protocolo define a transmissão de dados através de 4 cabos, dois pares diferenciais, exclusivamente *full-duplex* e portanto unidirecionais não reversíveis. Os cabos podem ter o comprimento de 1,2 metros, podendo chegar ao máximo de 1200 metros. As velocidades máximas de transmissão variam conforme o tamanho dos cabos implementados, podendo apresentar taxas de transição de 100kbit/s até 10Mbit/s.

O microprocessador embarcado no regulador usa uma porta USART(Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) para a transmissão e recepção dos bits. Portanto os sinais transmitidos pelo microprocessador necessitam passar por uma conversão para atender ao protocolo RS-422. Essa conversão é realizada por um *transceiver* ou *buffer*, o circuito equivalente simplificado deste componente é ilustrado pela figura 4. Além de transformar os sinais da USART para os níveis do RS-422 estes dispositivos também funcionam como isoladores galvânicos, protegendo o processador contra possíveis sinais que possam danificá-lo.

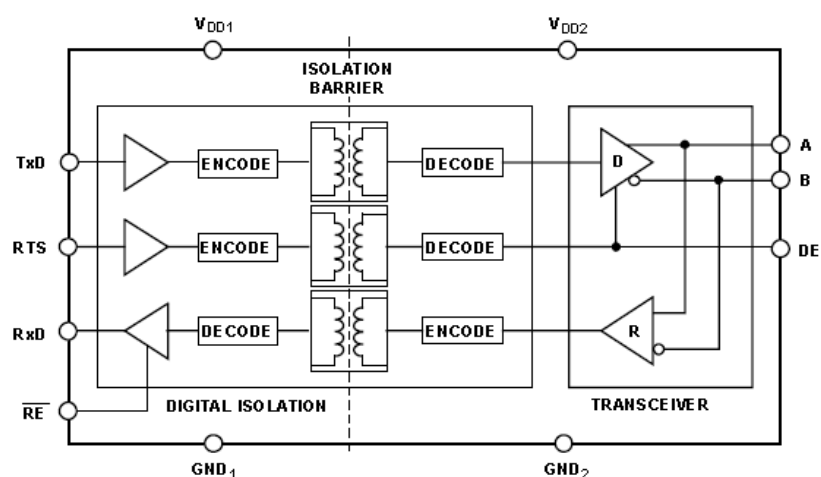


Figura 4. Circuito simplificado de um transiver RS-485

O transceiver exemplificado na figura 4 tem o seguinte funcionamento. Caso o sinal na porta RTS esteja em nível lógico alto, então o sinal digital recebido na porta TxD é transformado em um sinal diferencial que será transmitido entre as portas A e B. Caso o sinal na porta RE esteja em nível lógico baixo o transceiver transforma o sinal diferencial entre as portas A e B em um sinal que será transmitido na porta RxD. Desta forma um transceiver não pode enviar e receber dados ao mesmo tempo. No hardware do regulador foi implementado dois transceivers, um sempre em modo de transmissão e com a porta TxD ligada a saída da porta USART do processador e outro sempre em modo de recepção com a porta RxD ligada entrada da porta USART. Com isso temos uma implementação do protocolo de transmissão RS-422.

### **3.3: Camada de Enlace**

O sinal elétrico transmitido através da camada física é recebido pela camada de enlace. A camada de enlace é responsável pela verificação de erros de transmissão e outras inconsistências presentes nos telegramas. Ao detectar qualquer anomalia nas sequências de bytes recebidos a camada de enlace elimina o telegrama, servindo como um filtro para a camada de aplicação. No sistema implementado à camada de enlace é composta de três componentes, sendo um presente no hardware do microprocessador e os outros dois implementados no firmware.

A porta serial do microprocessador presente no regulador possui uma funcionalidade denominada pelo fabricante de "Receive error detection". O hardware se encarrega de checar a paridade dos bytes, o overflow dos registradores ligados a serial e a presença de erros por falta de sincronismo (framing errors). Portanto entrega para a unidade central de processamento apenas os bytes que não possuem nenhum desses erros.

Uma vez passando pela verificação de hardware os bytes recebidos são armazenados em um vetor, que ao final da recepção se torna um telegrama. Para que o telegrama possa ser entregue a camada de aplicação o mesmo deve ter um formato específico e passar por uma série de verificações feitas em firmware. A

camada de enlace descarta todos os telegramas não conformes com as configurações do dispositivo e as normas definidas pela camada de aplicação.

O firmware implementado realiza três verificações para concluir sobre a conformidade de um telegrama. Primeiramente checa-se se o valor do byte inicial é igual ao valor do endereço do dispositivo ou igual a zero, caso contrário o telegrama não se destina ao mesmo e então é descartado. Logo em seguida verifica-se se a função do telegrama, segundo byte na sequência, está entre as funções implementadas no dispositivo e caso não esteja, o telegrama é descartado. Por fim o telegrama passa pela verificação do CRC, *Cyclic Redundance Check*, sendo também descartado caso o valor calculado seja diferente do CRC presente na mensagem. A sequência das verificações implementadas na camada de enlace foi estabelecida visando a mínima ocupação do processador. Para isso, rotinas com menor custo computacional são executadas primeiro e na detecção de um erro tornam-se desnecessárias checagens mais demoradas, como o cálculo do CRC. Um diagrama seqüencial das operações é ilustrado na figura 5.

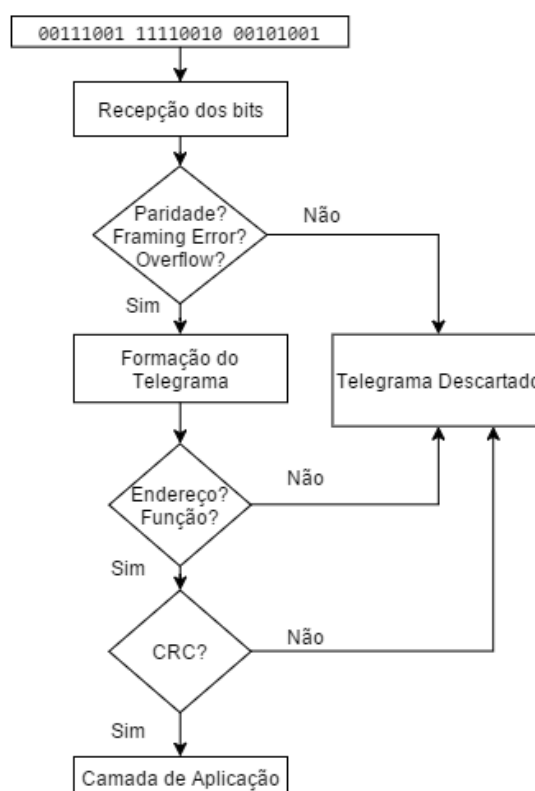


Figura 5. Sequência de verificações da camada de enlace

### **3.4: Camada de Aplicação - Modbus**

A escolha do protocolo para a camada de aplicação foi feita levando em conta alguns fatores como o hardware disponível, o protocolo presente na camada física, os requisitos de velocidade de transmissão de dados e distância entre dispositivos. Chegou-se a conclusão que o Modbus-RTU [ 1 ] seria a escolha mais adequada. O Modbus-RTU [ 1 ], além de atender os requisitos da aplicação, no que se diz respeito a velocidade e confiabilidade, já é usado em diversos produtos da empresa.

#### **3.4.1: Modbus™**

O protocolo Modbus foi publicado no ano de 1979 pela fabricante de CLPs Modicon, que hoje em dia é uma marca da empresa Schneider Electric. Sua fundamentação foi estabelecida visando a troca de dados em redes multiponto baseado em uma arquitetura mestre/escravo. O Modbus é um padrão aberto que descreve o formato das mensagens (telegramas) na rede. A camada física que dá suporte ao Modbus é de escolha livre do usuário, porém a primeira versão do Modbus foi implementada sob uma rede RS-232. Atualmente, a rede mais utilizada como camada física é a RS-485 devido seu maior alcance, maior velocidade e a possibilidade de ligação multiponto. Em um curto tempo após sua publicação o Modbus passou a ser implementado por diversos fabricantes em seus dispositivos de comunicação, se tornando um padrão industrial. O Modbus tornou-se largamente utilizado devido sua flexibilidade e simplicidade, possibilitando a criação de uma grande variedade de aplicações com confiabilidade e com baixo custo de implementação.

#### **3.4.2: Funcionamento do Modbus**

Dispositivos Modbus [ 1 ] usam o método de comunicação de mestre e escravo. Isto significa que apenas o dispositivo configurado como mestre pode iniciar a comunicação. Os dispositivos configurados como escravos apenas podem enviar respostas aos telegramas recebidos, isso caso o telegrama cumpra todos os requisitos do protocolo. O mestre pode enviar mensagens individuais ou coletivas,

para todos os escravos, através do broadcast. O formato do telegrama Modbus é fixo e composto por duas partes, que são o código da função e os dados.

Cada telegrama está associado a uma função e tem seu código definido pelo protocolo. Existem diversos códigos de funções nativas do protocolo, como as funções de leitura e escrita de registradores e funções que indicam exceções. Além das funções nativas, se necessário, o usuário pode criar suas próprias funções de acordo com o tipo de aplicação. O código da função Modbus é colocado no primeiro byte do telegrama e pode assumir valores dentro da faixa de 0 a 255. Sendo que funções com código maior que 0x80h indicam que o telegrama contém uma exceção enviada pelo escravo como resposta. A segunda parte do telegrama Modbus é o campo de dados, este campo tem o tamanho variável e depende do código da função presente no telegrama.

Para exemplificar o funcionamento do protocolo usaremos um diagrama temporal (Figura 6) e o conteúdo dos telegramas enviados por cada dispositivo.

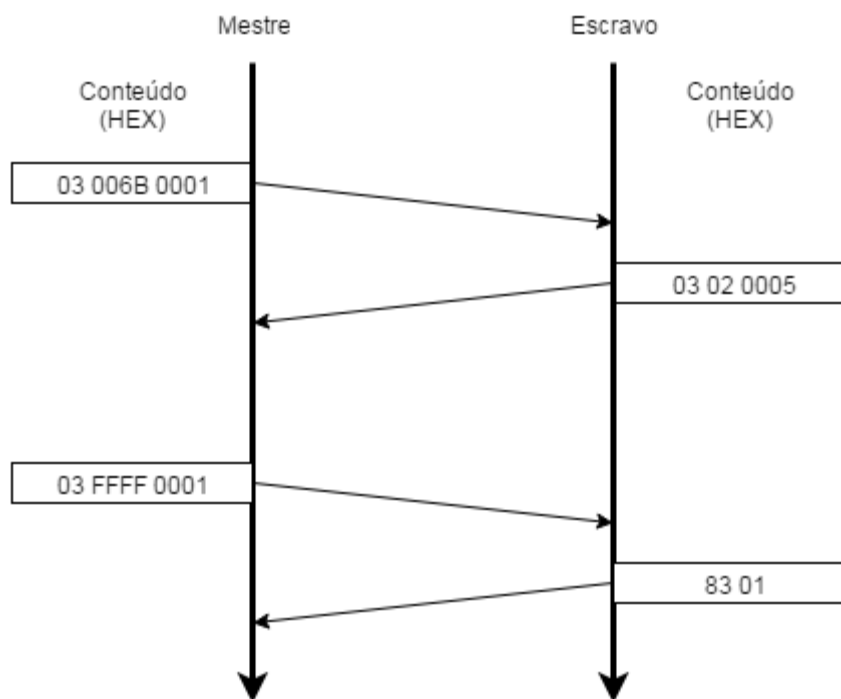


Figura 6. Diagrama temporal exemplo

No exemplo presente na figura 6 o dispositivo mestre primeiramente envia um telegrama requisitando a leitura de um registrador do escravo e o mesmo logo em



seguida envia uma resposta com o valor contido neste registrador. Logo em seguida o mestre faz uma nova requisição de leitura de um registrador do escravo, porém o escravo responde com uma exceção, já que o registrador requisitado pelo mestre não existe.

### **3.4.3: Modbus ECW**

No escopo do projeto foram criadas diversas funções de comunicação seguindo o protocolo Modbus [ 1 ], afim de construir uma biblioteca de uso genérico que realizasse a comunicação entre dois ECWs através deste protocolo. Estas funções são largamente utilizadas durante o funcionamento do modo de operação em duplo canal e são responsáveis pela troca de informações entre os reguladores. Devido a uma definição de projeto, todas as variáveis da memória do regulador são armazenadas com 32 bits. Porém o padrão Modbus define a troca de variáveis de 16 bits. Logo toda a implementação foi feita para que o tamanho mínimo de uma variável fosse de dois registradores Modbus. Desta forma existem algumas restrições na sua operação, como por exemplo a leitura ou escrita em um número ímpar de registradores. No restante o protocolo implementado está conforme o padrão e pode ser consultado em seu manual.

## **3.5: Heart-Beat**

Além da comunicação de dados o sistema desenvolvido também conta com um mecanismo de identificação rápida do funcionamento do regulador conectado, chamado de “Heart-Beat”. Este mecanismo funciona baseado na emissão e recepção de pulsos. Ambos reguladores emitem batimentos e também são capazes de receber batimentos para com isso aferir o funcionamento do regulador parceiro.

### **3.5.1: Hardware**

O hardware que permite a emissão e recepção dos pulsos elétricos é baseado em transistores e opto-acopladores a fim de isolar o processador de sinais elétricos indesejados que possam danificá-lo. Além dos cabos de transmissão é necessário também realizar a conexão dos planos de GND reguladores para que

ambos tenham a mesma referência lógica e também para permitir a passagem de pequenas correntes de um regulador para o outro. Um esquema elétrico simplificado pode ser visto na figura 7. Os sinais elétricos que chegam nos pinos do controlador são tratados como sinais de entrada e saída digitais e o seu tratamento é feito via firmware.

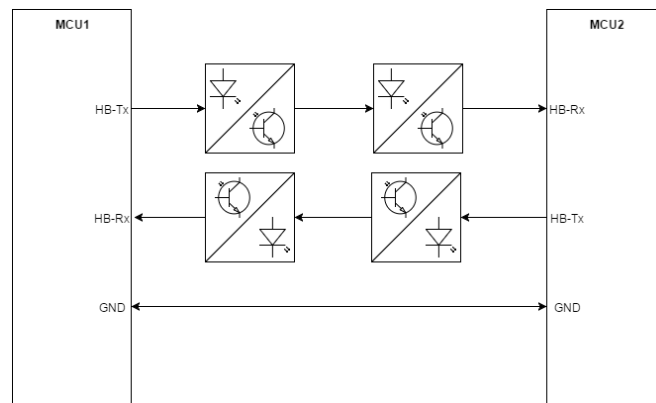


Figura 7. Esquema do hardware do Heart-beat

### 3.5.2: Firmware

Para enviar e receber os pulsos foi implementado uma rotina de leitura e escrita de portas digitais do micro controlador. Essa operação poderia ser feita via hardware, usando, por exemplo um PWM, para enviar e um contador de pulsos para receber os pulsos. Porém essas funções foram implementadas via firmware para garantir que o sistema operacional que roda dentro do regulador esteja funcionando perfeitamente, e caso “trave” o parceiro perceberá. Sendo assim, colocamos uma instrução para inverter o valor lógico da porta digital de saída, dentro da rotina de controle do regulador. E para aferir os batimentos que chegam ao regulador foi criada uma rotina do sistema operacional exclusiva cuja sua função é calcular a frequência dos batimentos e alterar a variável correspondente, caso o batimento deixe de existir.

### 3.5.3: Performance

Com esta implementação conseguimos detectar o desligamento de um dos reguladores após três ciclos da rotina de verificação, que é da ordem de 4ms. Apesar de ter sido implementada uma tarefa do sistema operacional exclusivamente

para realizar a aferição do batimento a carga do processador não apresentou aumentos significativos. A carga sobre o processador foi medida utilizando uma *feature* do sistema operacional que roda no ECW, que fornece o percentual de tempo em que o processador realiza operações em uma determinada fatia de tempo.

## **Capítulo 4: Duplo Canal**

O firmware que viabiliza a operação em modo de duplo canal foi implementado na linguagem C, assim como a maioria das outras rotinas do ECW. Além da biblioteca que contém as funções que gerenciam o modo de operação algumas outras alterações foram feitas no restante do projeto para integrá-lo. Neste capítulo será discutido um pouco sobre a estrutura do projeto de firmware presente no ECW e também os algoritmos e máquinas de estados e controlam o modo de operação.

### **4.1: Estrutura do projeto do ECW**

O projeto de firmware presente no regulador de tensão da WEG conta com um conjunto de bibliotecas implementadas em C/C++ e alguns arquivos de configuração implementados na linguagem Assembly. Cada biblioteca contém um conjunto de funções que são utilizadas em um mesmo contexto, como por exemplo todas as rotinas de cálculo de filtros ficam em uma mesma biblioteca. Essas funções são chamadas de acordo com a necessidade do código principal que roda no micro processador. Este código principal é na verdade um sistema operacional de tempo real, que basicamente analisa todas as tarefas que têm que executar e controla qual tarefa deve executar em um determinado momento. Sendo assim, fica uma impressão para o usuário de todas as tarefas que estão sendo executadas simultaneamente. No ECW existem cerca de quinze tarefas, sendo que cada um tem o seu período de execução, prioridade e tamanho de pilha definidos na sua inicialização. Existem tarefas que calculam a ação de controle, checam as proteções e outras que cuidam da comunicação do regulador com outros dispositivos. O algoritmo criado para gerenciar o modo de operação em duplo canal foi implementado em uma tarefa do sistema operacional (Micrium  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ ) e roda com período fixo de aproximadamente 5ms.

### **4.2: Máquina de estados finitos**

Para uma melhor organização do código e também para facilitar a depuração do mesmo, foi aconselhado pela equipe de desenvolvimento de firmware da

empresa a utilização do conceito de máquinas de estados finitos. Uma máquina de estados finitos (Finite State Machine, FSM) é uma notação muito utilizada em sistemas digitais e computacionais. Uma FSM possui um estado atual e um número finito de estados que pode ocupar de acordo com uma sequência de entradas do sistema.

Para projetar a máquina de estados que controla o modo de operação em duplo canal foram definidos os possíveis estados, quais ações deveriam ser tomadas em cada estado e quais dados seriam analisados para a mudança de estado.

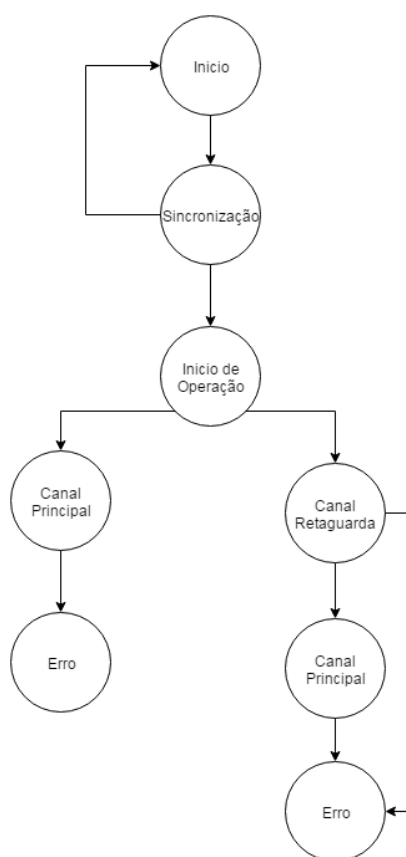


Figura 8: Máquina de estados para o controle do modo de operação em duplo canal

Na figura 8 podemos ver um diagrama que contém os possíveis estados e suas respectivas transições.

Em sua inicialização o algoritmo carrega as configurações feitas pelo usuário e alguns parâmetros específicos do regulador a fim de checar a viabilidade da operação em modo de duplo canal. Como é o caso da versão de firmware presente

no regulador, caso a mesma seja diferente da versão de firmware do regulador parceiro, não é possível a operação em duplo canal e a tarefa é interrompida.

Uma vez passado por todas verificações necessárias ambos reguladores entram em estado de sincronismo. Neste estado os parâmetros não calibráveis são transmitidos do regulador principal para o regulador retaguarda através da comunicação Modbus. Neste procedimento o regulador principal, que é também o mestre Modbus, monta telegramas contendo o conteúdo de vinte parâmetros e os envia. Assim quando termina de enviar todos seus parâmetros, em torno de 150, o mestre sinaliza para o escravo que o sincronismo acabou e ambos seguem para o próximo estado. Esta operação demora em torno de 3 a 4 segundos e caso ocorra algum erro a operação é reiniciada.

Tendo ambos reguladores com os parâmetros clonados o sistema agora se encontra pronto para operar em modo de duplo canal. Sendo assim o regulador configurado como principal vai para o estado “Canal Principal” e o regulador retaguarda vai para o estado “Canal Retaguarda”. Para o regulador que opera como canal principal o código implementado no modo de operação em duplo canal não influencia no restante do código do regulador. Já o regulador que opera como retaguarda verifica a cada ciclo o funcionamento do principal, afim de executar uma comutação em caso de falha, desligamento ou mau funcionamento do regulador principal. Neste caso, o regulador que antes estava no estado de “Canal Retaguarda” vai para o estado “Canal Principal” e começa a operar a máquina segundo as últimas referências recebidas pelo regulador que deixou de funcionar, como por exemplo referências de controle e variável controlada.

Existe também na máquina de estados um estado que indica erro. Este estado é atingido sempre que um dos limitadores configurados forem ativados. Existe no ECW500 uma rotina que monitora e limita certas variáveis ligadas ao funcionamento do regulador, como por exemplo temperatura do módulo de potência, perda de realimentação, cabos desconectados e timeouts de comunicações. Estas variáveis são lidas pela rotina do modo de duplo canal e caso sinalizem um sinistro e estejam habilitadas geram um erro para o modo de operação em duplo canal.

Quando esse erro ocorre no regulador em retaguarda nada ocorre ao sistema, que apenas passa a operar sem a redundância. Porém o erro ocorre no

regulador principal, o mesmo sinaliza para o redundante que estiver livre de erros assumira o controle da excitação da máquina. A tabela 3 expõe as variáveis que podem ser configuradas para gerar erros no modo de operação de duplo canal.

*Tabela 3: Lista de erros configuráveis para o modo de duplo canal*

Nome da Variável	Significado
ErrorOnPowerDriverS1F	Erro no modulo 1 do IGBT
ErrorOnPowerDriverS2F	Erro no modulo 1 do IGBT
FieldDisconnectedF	Cabo de campo desconectado
CortexCommTimeoutF	Timeout na comunicação com o processador da potência
PowerPhaseFaultF	Falha na alimentação da potencia
PowerTemperatureF	Super-aquecimento da potencia
TerminalOverVoltageF	Sobre tensão nos terminais da maquina
TerminalUnderVoltageF	Sub tensão nos terminais da maquina
FieldOverVoltageF	Sobre tensão no campo
OverExcitationF	Sobre excitação no campo
AI420mACableLossF	Saida 4 a 20mA sem cabo
FeedbackLossF	Perda de realimentação
ExcDiodeProblemF	Erro no diodo gigante
LowFrequencyF	Baixa frequência de rotação da maquina
DCLinkOverVoltageF	Sobre tensão no link CC

### 4.3: Configurações

Devido algumas experiências que tivemos durante o período de estágio no acompanhamento dos usuários do setor de montagem de painéis, percebemos que o processo de parametrização dos drives é algumas vezes muito custosos e em casos particulares demandam até profissionais do setor de desenvolvimento. Portanto um dos objetivos buscados durante toda a implementação do modo de operação em duplo canal era criar um sistema que fosse facilmente parametrizável. Com isso fizemos um levantamento de todos os parâmetros envolvidos no modo de operação e fizemos uma separação de quais parâmetros realmente deveriam ser responsabilidade do usuário e quais poderiam ser configurados automaticamente.

Ao final da implementação chegamos a basicamente três parâmetros que eram realmente necessários: um parâmetro para habilitar e desabilitar a operação em duplo canal, um para distinguir se aquele regulador deve funcionar como principal ou

redundante e um vetor de flags para sinalizar quais erros do regulador devem gerar erros no modo de operação em duplo canal.



## Capítulo 5: Testes

Após o término da implementação do código responsável pela interface de comunicação entre os reguladores e pela lógica de comutação, foram realizados alguns testes afim de validar o desempenho do sistema e o cumprimento dos requisitos especificados.

### 5.1: Testes temporais

Inicialmente montamos as ligações elétricas para o funcionamento da comunicação e demais sinais necessários para a operação em duplo canal. Porém sem realizar qualquer conexão com a alimentação de potência e carga, pois não se tinha certeza do funcionamento do sistema.

O primeiro teste realizado foi o teste temporal de comutação. Nesse teste objetivava-se medir o tempo de atraso entre a parada de um dos reguladores e o momento em que o regulador retaguarda assume o controle. Verificamos a existência de dois tempos de comutação. No caso da ocorrência de uma falha, a mesma é enviada por meio da comunicação Modbus e sua resposta ocorre em torno de 50ms. O segundo caso ocorre quando acontece um travamento ou desligamento do regulador principal. Neste caso o regulador em retaguarda precisa esperar um *timeout* de comunicação e a ausência do sinal de “Heart-Beat” para assumir que o regulador principal está fora de operação e então começar a excitar a carga. Esta resposta é mais lenta e tem um tempo de resposta de 250ms no pior dos casos. Nas figuras 9 e 10 podemos ver o resultado dos testes temporais, sendo que o nível lógico alto indica o estado de funcionamento do regulador, e que o traço alaranjado é referente ao regulador principal e o traço azul referente à retaguarda.

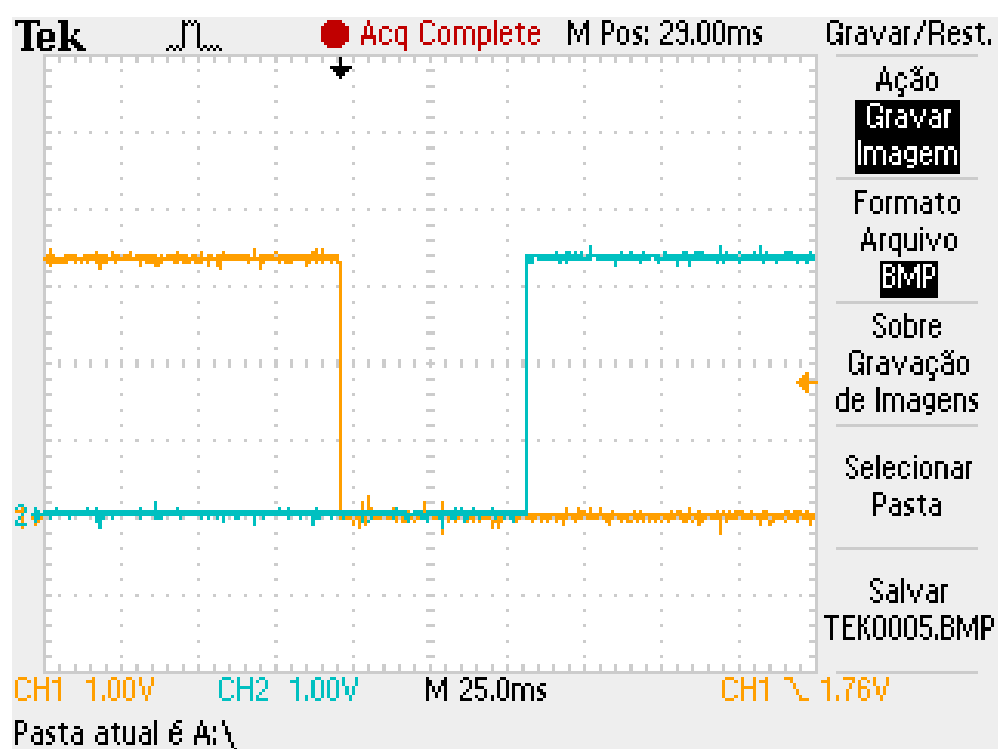


Figura 9: Oscilograma da comutação por erro

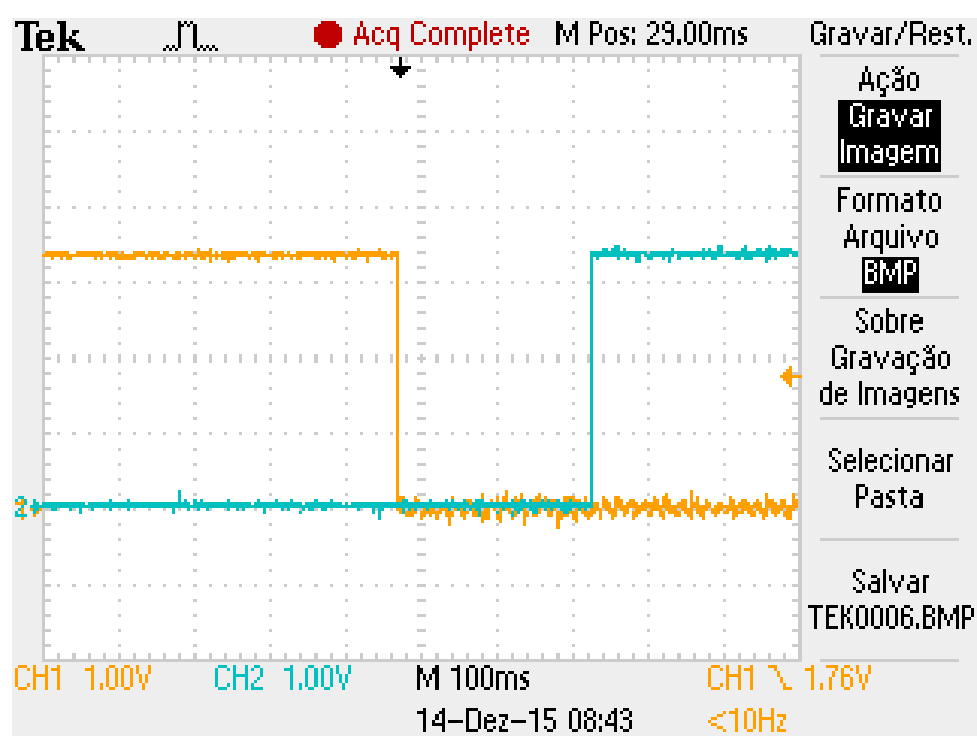


Figura 10: Oscilograma da comutação por desligamento

Tendo os tempos de comutação registrados surgiu uma dúvida sobre o comportamento da corrente após o comando de desligamento do regulador. Pois se um regulador inicia a excitação com o outro regulador ainda ligado, certamente danificaríamos o sistema. Observamos então o sinal de comando de desligamento do regulador e o sinal de PWM aplicado ao módulo IGBT. Verificando que em nenhum dos casos ocorriam pulsos de PWM após o comando de desligamento do regulador, como podemos observar na figura 11. Em azul temos o traço que indica o estado de funcionamento do regulador e em alaranjado o pulso de PWM nos terminais do módulo IGBT.

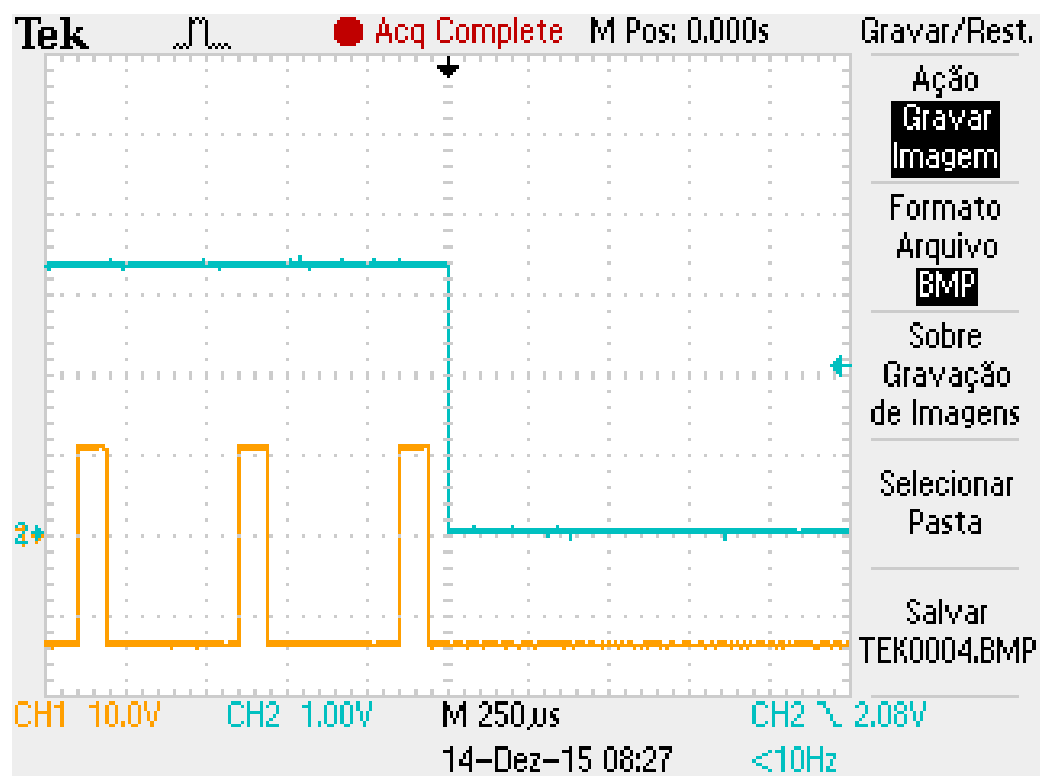
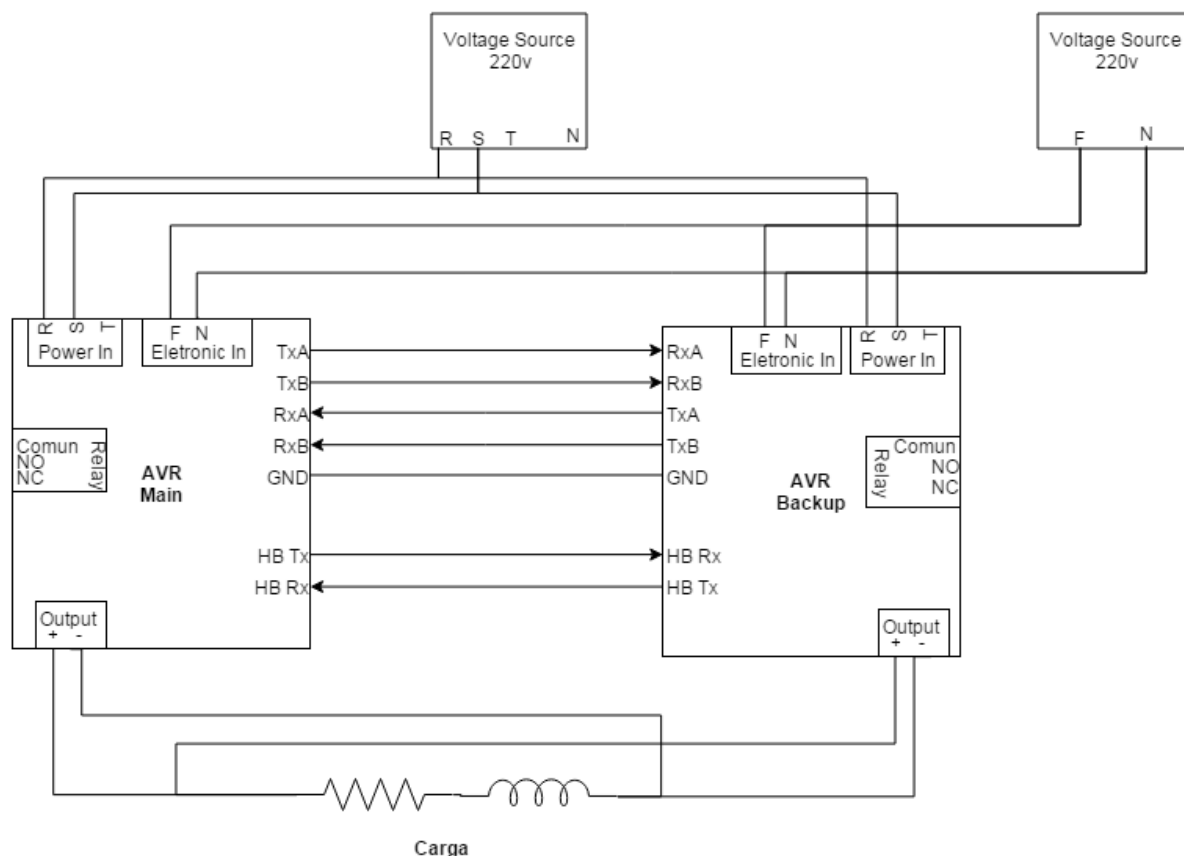


Figura 11. Oscilograma do comando de desligamento e do pulso de PWM

## 5.2: Testes elétricos

Com a garantia temporal de funcionamento do sistema em duplo canal passamos para os testes de tensão em corrente sob a carga. Nestes testes objetivava-se analisar o comportamento das grandezas elétricas aplicadas à carga no momento da comutação.

Adicionamos então para os testes elétricos a alimentação do circuito de potência em ambos reguladores e suas saídas a uma carga RL. Esta montagem nos permitia operar em modo de controle de corrente, já que a carga tem a mesma natureza de uma excitatriz de uma máquina síncrona. O diagrama simplificado do esquema elétrico é representado na figura 12



*Figura 12: Esquema inicial de ligações elétricas para testes.*

Montamos no circuito ponteiras de medição de corrente nas saídas de ambos reguladores afim de captar a influência do funcionamento de um regulador no outro, já que suas saídas estavam interligadas. Observamos que a corrente emitida por um dos reguladores circulava para dentro do outro regulador independente do seu estado. E também devido a este fato o regulador ativo não conseguia regular a corrente na carga.

Após alguns estudos de caso de aplicações instaladas pela empresa, descobriu-se que para o correto funcionamento deste tipo de sistema é necessário realizar o isolamento da saída dos reguladores. Sendo assim empregamos um contator fabricado pela própria empresa que possuía quatro contatos, dois

normalmente abertos e dois normalmente fechados, ilustrado na figura 13. A bobina do contator é controlada pelo regulador em retaguarda, ativando-a no momento em que desejar assumir o controle da carga. Um diagrama simplificado do novo esquema elétrico pode ser visto na figura 14 e uma foto da bancada montada para os testes em laboratório na figura 15.



Figura 13. Contator WEG utilizado no isolamento dos reguladores

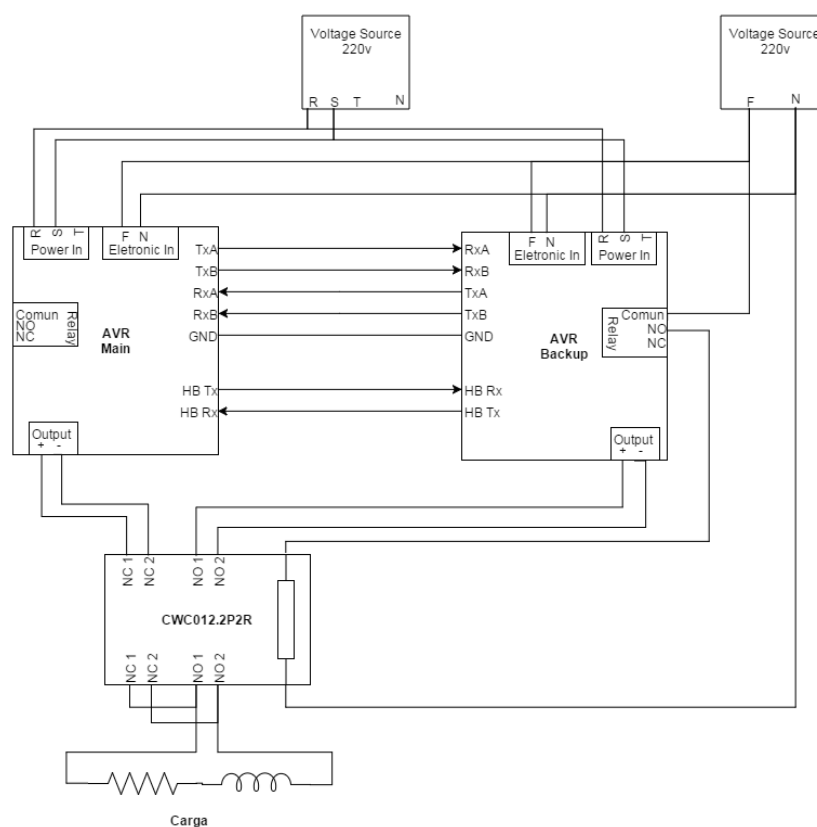


Figura 14. Esquema final de ligações elétricas para testes.

Tabela 4: Legenda de símbolos do diagrama

Conector ECW	Simbolo no Diagrama	Descrição
XC3	Power In	Alimentação da potência
XC60	Eletronic In	Alimentação da eletrônica
XC4	Output	Saida do regulador
XC11:1	RxB	Receptor sinal serial diferencial A
XC11:2	RxA	Receptor sinal serial diferencial B
XC11:3	TxB	Emissor sinal serial diferencial A
XC11:4	TxA	Emissor sinal serial diferencial B
XC11:5	GND	Terra da IHM
XC11:7	HB Tx	Emissor do pulso de Heart-Beat
XC11:8	HB Rx	Receptor do pulso de Heart-Beat
XC10:5	Relay Comun	Contato comum do relé configurável 01
XC10:6	Relay NO	Contato Norm. Aberto do relé configurável 01

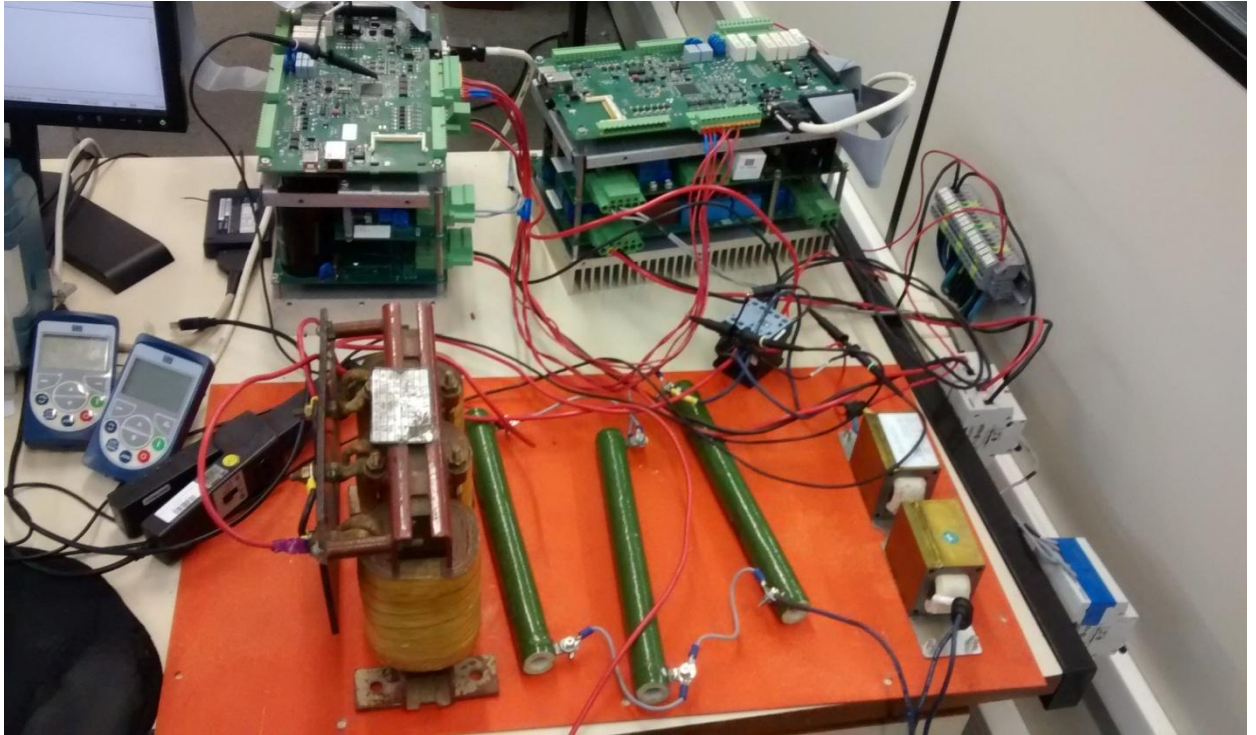


Figura 15. Foto da bancada com circuito montado

Com o circuito de isolamento montado realizamos testes com um carga RL ligada na saída dos reguladores e com o regulador principal operando em modo de controle de corrente. Devido à baixa constante de tempo da carga montada, notamos que no momento em que o regulador principal desligava-se a corrente caía a zero imediatamente e voltava com um pico devido ao acionamento do controle do regulador em retaguarda sem rampa de referência. O resultado pode ser visualizado na figura 16.

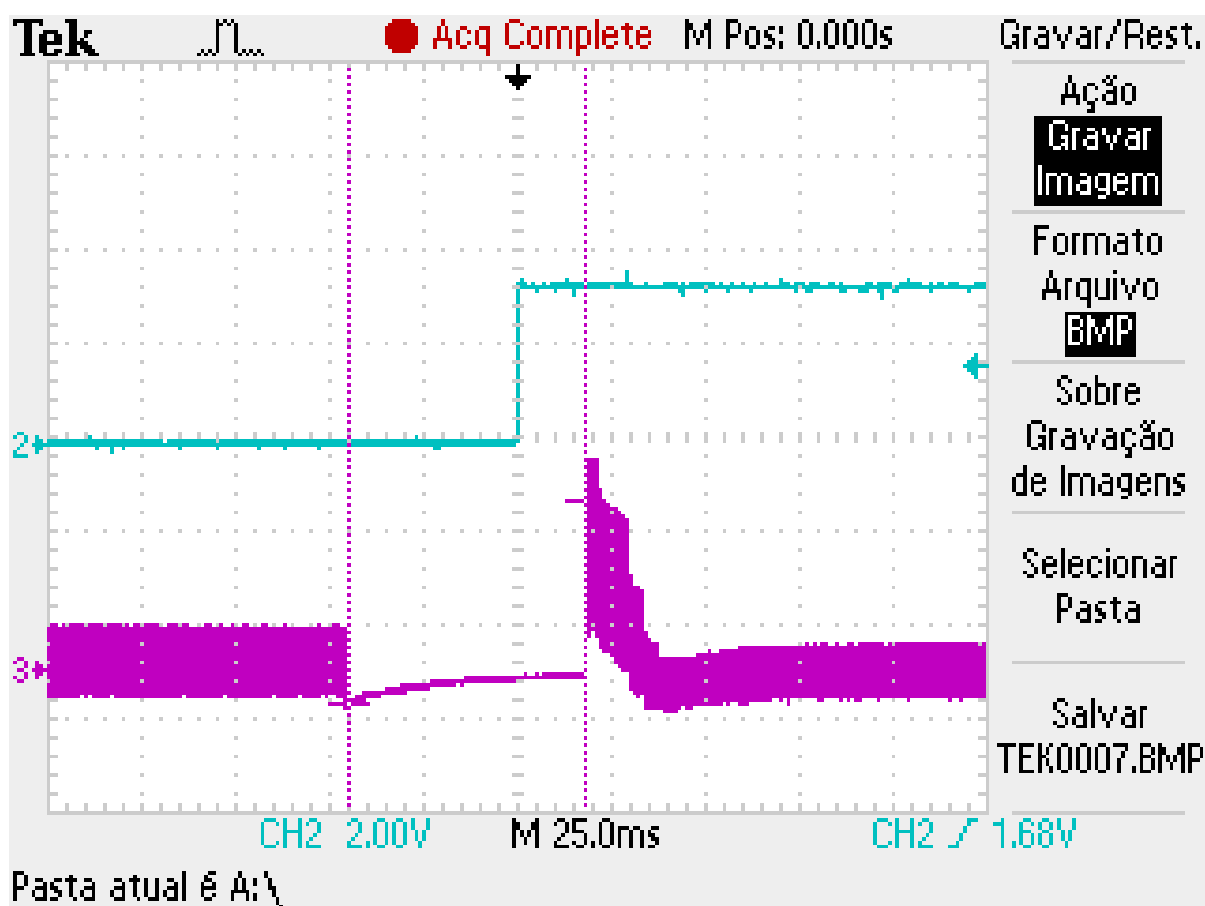


Figura 16. Oscilograma da tensão na carga no momento da comutação

Após alguns testes percebeu-se que a existência de um atraso entre o acionamento da bobina do contator e a comutação dos contatos mecânicos. Sendo assim realizamos um teste para medir os tempos entre o acionamento do contator e o contato físico da carga com o regulador. Foi realizado então um novo teste para captar os tempos de comutação do relé, ilustrados na figura 17.



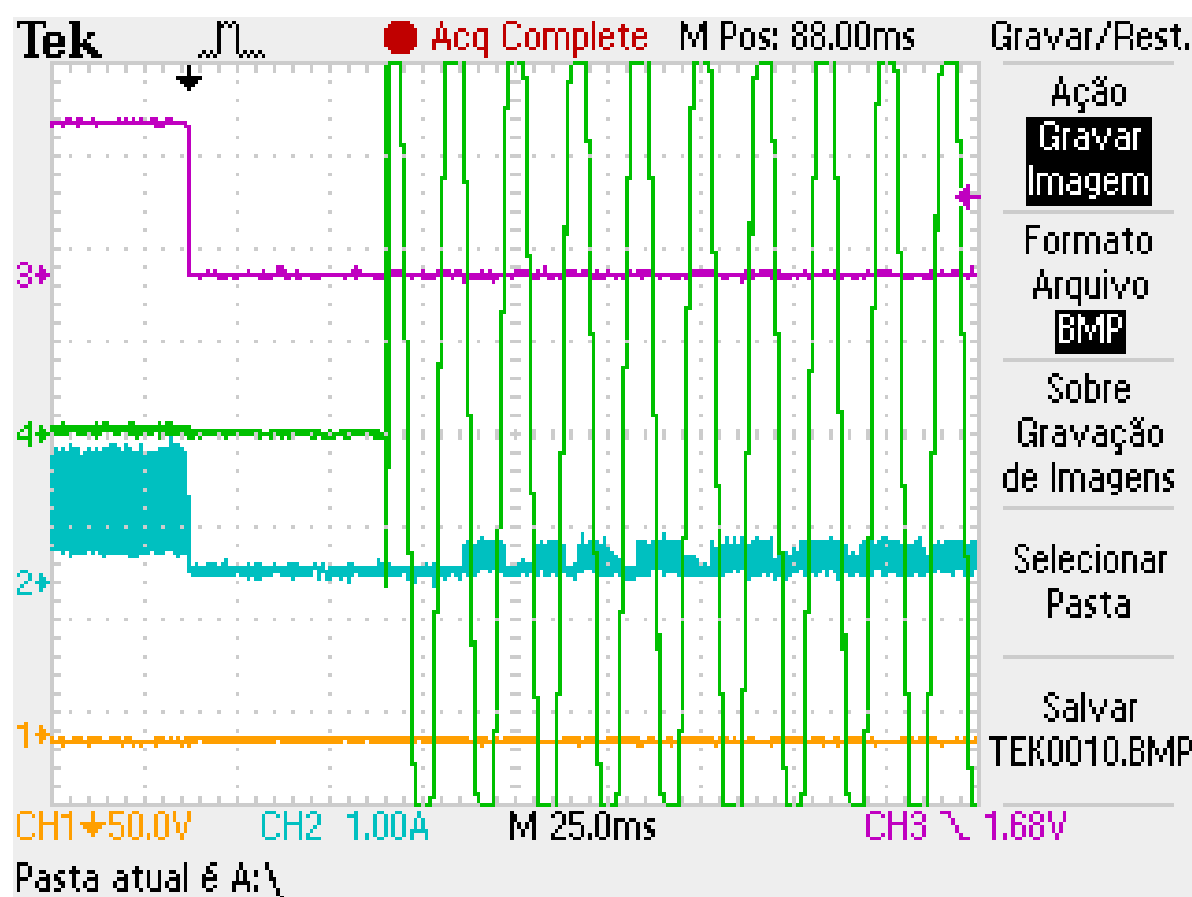


Figura 17. Oscilograma de medição do tempo de ativação do contator

No oscilograma acima temos em roxo o traço que indica o funcionamento do regulador principal, em verde a tensão na bobina do contator e em azul a tensão sobre a carga. Neste teste podemos perceber o atraso mecânico do contator, que após receber um tensão em sua bobina (em verde) demora aproximadamente 30ms para estabelecer o contato mecânico, que pode ser percebido pelo traço em azul.

Após alguns testes de comutação chegamos a um valor médio de 30ms entre o acionamento da bobina do contator e o estabelecimento real do contato. Com isso conseguimos aferir os tempos máximos garantidos para a comutação do sistema de operação em duplo canal. Ficando então com aproximadamente 50ms para o caso de erro e 260 ms para o caso de desligamento.

## Capítulo 6: Resultados e considerações finais

Apesar do curto tempo de trabalho alocado para o desenvolvimento do modo de operação descrito neste documento, a equipe responsável julgou como satisfatória sua performance e qualidade da solução implementada. Conseguimos um sistema de fácil parametrização, sem modificações nos componentes de hardware do ECW e que pelos resultados dos testes iniciais atende as especificações estabelecidas.

Na continuação do projeto está previsto alguns estudos e testes afim de melhorar o tempo de comutação entre os reguladores levando em consideração apenas o heart-beat e portanto não necessitando esperar pelo tempo de um timeout. Também está previsto a validação através de testes mais rigorosos das funções criadas, com objetivo de averiguar o funcionamento correto do regulador em situações reais de operação em campo.

O novo modo de operação e as novas conectividades desenvolvidas, como o ethernet e o Anybus, serão incorporadas na renovação do produto e logo estarão no mercado.

Os seis meses de estágio foram de grande importância para a minha formação acadêmica. Pelas experiências vividas e os conhecimentos que me foram passados. Consegui estabelecer ligações mais sólidas entre os assuntos vistos em aula e o que realmente é aplicado no mercado. Apesar de não continuar na empresa devido à situação econômica brasileira atual, continuarei buscando traçar uma carreira no setor.

## **Bibliografia:**

[ 1 ] Especificação do protocolo Modbus. Disponível em:

[http://www.modbus.org/docs/Modbus\\_Application\\_Protocol\\_V1\\_1b3.pdf](http://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf)

Acesso em 19 de janeiro de 2016

[ 2 ] Manual do usuário do regulador de tensão da WEG, ECW500. Disponível em :

<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-ecw500-manual-do-usuario-10001525643-manual-portugues-br.pdf>> Acesso em

[ 3 ] Maquinas Síncronas, Jordão R, G. 2º Edição, 2013